

наук.-практ. семінару «Методичні аспекти застосування електротехнічного обладнання фірми LENZE у навчальному процесі і виробництві». – Харків: ХДТУБА, 2007. – С.51-56.

Получено 29.09.2009

УДК 621.331

В.Г.УЛИТИН

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», г.Москва

ПРОБЛЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ НА ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Описывается проблема использования энергосберегающих технологий на городском электрическом транспорте. Рассмотрены основные проблемы, связанные с применением рекуперативного торможения как основного направления совершенствования системы электроснабжения для получения экономии энергии. Для линии скоростного трамвая выполнена оценка избыточной энергии рекуперации, которая подтверждает необходимость и целесообразность использования энергии электрических торможений.

Описано проблему використання енергозберігаючих технологій на міському електричному транспорті. Розглянуті основні проблеми, що пов'язані з використанням рекуперативного гальмування як основного напрямку покращення системи електроживлення для економії електроенергії. Для мережі швидкісного трамваю виконана оцінка надлишку енергії рекуперації, яка підтверджує необхідність і доцільність використання енергії електричних гальмувань.

In article the problem of the usage energy-efficient technologies for urban electrical transport is described. There are examined fundamental problems connected with usage of regenerative braking, as the area trend of improving power supply system for the purpose of reception of spare energy. Estimation of the surplus regenerative energy is executed for a line of light rails, which confirms need and practicability of using the electrical braking energy.

Ключевые слова: электрический транспорт, скоростной трамвай, электрическое торможение, рекуперация.

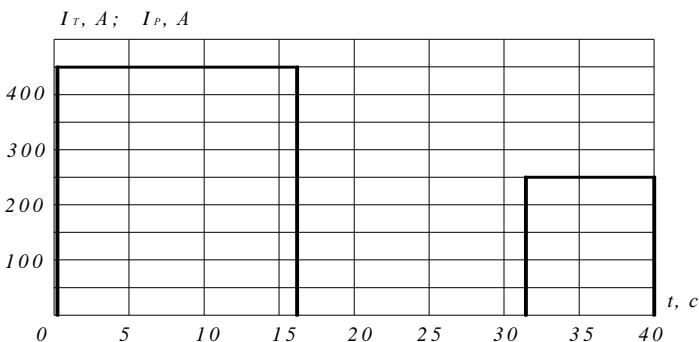
В рамках большого города энергоемкость электрического транспорта достаточно велика, что, при постоянном удорожании энергоносителей, является основной причиной убыточности транспортных предприятий, специализирующихся на пассажирских перевозках. Как следствие, возникает интерес к внедрению энергосберегающих технологий [1-4].

Активное применение рекуперативного торможения на городском электрическом транспорте представляет наиболее эффективную возможность получения экономии электроэнергии в размерах от 15 до 30% от общих затрат электроэнергии на тягу. До настоящего времени возможности рекуперации используются далеко не в полной мере. Ос-

новой причиной этого является определенное усложнение электрического оборудования подвижного состава и режимов его работы, повышение уровня напряжения в тяговой сети. Ещё одним вопросом, связанным с эффективностью применения рекуперации, является проблема реализации энергии в те интервалы времени, когда на линии отсутствуют потребители. Энергия рекуперирующего подвижного состава, не находящая потребителей, носит название «избыточная энергия рекуперации». Ниже предпринята попытка уточнить значение этой составляющей.

Для большей эффективности использования энергии рекуперации необходимо обеспечить наиболее стабильные условия движения, как например, на метрополитенах и изолированных линиях скоростного трамвая. В связи с этим рассмотрим трамвайный вагон типа 71-630 Усть-Катавского вагоностроительного завода, который был специально разработан для работы на линиях скоростного трамвая.

Расчет кривых движения для перегона длиной 350 м дает следующие результаты: время движения по перегону 40 с, скорость сообщения 35 км/ч, стоянка 10 с. На рисунке показана принятая упрощенная кривая тока и длительность режимов: тяга – 16,5 с, рекуперация – 8 с, полное время цикла – 50 с. Относительные длительности циклов: тяга – 0,33 с, выбег – 0,51 с, рекуперация – 0,16 с. Средний ток тяги за время движения под током принимаем 450 А, средний ток за время рекуперации – 250 А.



Упрощенная диаграмма сетевого тока

Используя принципы теории вероятностей, можно определить вероятность появления избыточных токов рекуперации при различных условиях движения. Зададим интенсивность трамвайного движения

50 пар вагонов в час для двухпутного участка длиной 2,8 км. Интервал при этой интенсивности составит 1,2 мин., что соответствует наличию восьми вагонов на участке питания. Среднее значение тока, потребляемого на тягу, за время цикла без рекуперации одного вагона 148,5 А, восьми вагонов – 1188 А. Средний ток рекуперации вагона 40 А. Ток участка с учетом рекуперации 868 А.

Используем формулу для определения вероятности p ситуации, при которой из n вагонов, движущихся по участку, a вагонов находятся в состоянии тяги, b – в состоянии рекуперации, и, соответственно $(n-a-b)$ в режиме выбега. При этом относительное время нахождения в тяге – c , в режиме рекуперации – d , в режиме выбега $(1-c-d)$. Для нашего примера: $n=8$; $c=0,33$; $d=0,16$.

$$p = \left(\frac{n!}{a!b!(n-a-b)!} \right) c^a d^b (1-c-d)^{n-a-b}.$$

Для расчета при $n=8$ составлена матрица (табл.1). Значения c и d остаются постоянными для всего расчета.

Таблица 1 – Результаты расчета избыточного тока рекуперации для 8 вагонов

№ п/п	Тяга, а	Рекуперация, б	Выбег	Вероятность режима	Избыточный ток рекуперации, А	Время, с	Показатель, А*с
1	2	3	4	5	6	7	8
1	8	0	0	0,00014			
2	7	1	0	0,000545			
3	7	0	1	0,00173			
4	6	2	0	0,000925			
5	6	1	1	0,0059			
6	6	0	2	0,0094			
7	5	3	0	0,000897			
8	5	2	1	0,0085			
9	5	1	2	0,0536			
10	5	0	3	0,02907			
11	4	4	0	0,0034			
12	4	3	1	0,00693			
13	4	2	2	0,033			
14	4	1	3	0,0704			
15	4	0	4	0,0566			
16	3	5	0	0,000422			
17	3	4	1	0,0033			
18	3	3	2	0,0214			
19	3	2	3	0,0683			
20	3	1	4	0,10891			
21	3	0	5	0,0694			
22	2	6	0	0,000051	600	0,9	540
23	2	5	1	0,000978	350	17,4	6090
24	2	4	2	0,001732	100	31,2	3120
25	2	3	3	0,00345			

Продолжение табл.1

1	2	3	4	5	6	7	8
26	2	2	4	0,0792			
27	2	1	5	0,10099			
28	2	0	6	0,05365			
29	1	7	0	0,0000071	1300	0,12	156
30	1	6	1	0,00158	1050	3,0	3150
31	1	5	2	0,00151	800	28,18	22544
32	1	4	3	0,00803	550	144,54	79497
33	1	3	4	0,00107	300	19,2	5760
34	1	2	5	0,04897	50	881,46	44073
35	1	1	6	0,05203			
36	1	0	7	0,02369			
37	0	8	0	0,0000004	2000	0,000..	0,00..
38	0	7	1	0,0000109	1750	0,18	315
39	0	6	2	0,000122	1500	1,8	2700
40	0	5	3	0,000779	1250	13,8	17250
41	0	4	4	0,0031	1000	55,8	55800
42	0	3	5	0,007914	750	142,2	106650
43	0	2	6	0,01261	500	227	113500
44	0	1	7	0,011487	250	207	51750
45	0	0	8	0,00458			
Всего:				0,987			512895

В колонке «Вероятность режима» указаны вероятности случаев совпадения количества вагонов a и b , находящихся в режимах тяги и рекуперации. В колонке «избыточный ток рекуперации» указаны возможные избыточные токи для соответствующих случаев. Режимы с избыточным током относительно редки, они имеют место в ситуациях 22,23,24, 29-34 и 37-44. Для этих совпадений определены длительности их существования, найденные как произведение общего времени нахождения поезда на участке на вероятность совпадения. В крайней правой колонке приведен показатель, равный произведению избыточного тока рекуперации на длительность его существования (в ампер*секундах) за 5 ч интенсивного движения (принято, что в течение 5 ч на участке находятся восемь вагонов, что характерно для часов с пиковыми нагрузками). Принимая уровень напряжения на токоприемнике вагона в периоды существования избыточного тока 700 В получим избыточную энергию рекуперации за 5 ч:

$$A_{ИРВ} = \frac{512895 \cdot 700}{3600 \cdot 10^3} = 99,73 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Расчеты для ситуации с 6, 4, 3, 2, 1 вагонами сведены в табл.2.

Выполним процентную оценку избыточной энергии рекуперации. В анализируемом примере средний ток одного вагона за полное время движения по участку, включая время стоянок и без учета рекуперации,

составит 148,5 А. За это же время средний ток рекуперации равен 40 А. Средний ток поезда с учетом возврата энергии рекуперации составит 108,5 А. Расчетное напряжение на токоприемнике поезда в тяге принималось увеличивающимся по мере снижения нагрузки. Напряжение на токоприемнике при режиме избыточной энергии рекуперации принималось 700 В.

Результаты расчета сведены в табл.3.

Таблица 2 – Результаты расчета избыточной энергии рекуперации

Число вагонов	8	6	4	3	2	1
Время работы на линии n, ч	5	7	4	1	1	1
Аир, кВт ч	99,73	228,5	164,05	38,57	37,52	28
Аир/п, кВт ч	19,95	32,64	41,01	38,57	37,52	28

Таблица 3 – Результаты расчета относительной избыточной энергии рекуперации

Количество вагонов	Ток линии, А	Напряжение в контактной сети, В	Потребляемая мощность, кВт	Мощность избыточной энергии рекуперации, кВт	Отношение избыточной энергии рекуперации к потребляемой, %
8	868	550	477,4	19,95	4,2
6	651	560	364,6	32,64	9,0
4	434	570	247,4	41,01	16,6
3	325,5	575	187,2	38,57	20,6
2	217	580	125,9	37,52	29,8
1	108,5	590	64	28	43,8

Определим удельный расход энергии на движение вагона для рассматриваемых условий без учета рекуперации. Среднее значение тока вагона за время цикла $T_{ц} = 50$ с составляет 148,5 А. Длина перегона $L = 0,35$ км. Масса вагона 33 т. При наполнении вагона 180 человек масса пассажиров составит (при среднем весе одного пассажира 60 кг) 10,8 т. Расчетная масса вагона M брутто – 43,8 т. Напряжение в контактной сети $U = 560$ В при интенсивности движения шести машин (табл.3).

Удельный расход энергии на тягу составит:

$$A_{уд} = \frac{I \cdot U \cdot T_{ц}}{3600 \cdot M \cdot L} = \frac{148,5 \cdot 560 \cdot 50}{3600 \cdot 43,8 \cdot 0,35} = 75 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / (\text{т} \cdot \text{км}).$$

Доля избыточной энергии рекуперации при различном числе машин составит:

8 машин – 3,2; 6 – 6,8; 4 – 12,5; 3 – 15,5; 2 – 22,4; 1 – 32,9 Вт·ч/ (т·км).

Для определения этих значений было использовано отношение избыточной энергии рекуперации к потребляемой в % (табл.3).

Расчет показал, что среднесуточное значение отношения избыточной энергии рекуперации к потребляемой на тягу энергии составляет 20,7%.

Следует заметить, что сделанные выше оценки значений избыточной энергии рекуперации выполнены без учета потребления некоторой части энергии на участке системами собственных нужд вагонов, а также возможности передачи части избыточной энергии на соседние участки контактной сети через шины тяговой подстанции. Отмеченные обстоятельства снижают реальные значения этой энергии против полученных выше значений.

На основании полученного результата можно сделать вывод о необходимости использования избыточной энергии рекуперации в целях экономии электроэнергии.

Дальнейшие исследования рассматриваемой проблемы должны быть направлены на анализ и выбор конкретного технического решения накопителя избыточной энергии рекуперации, на выбор наиболее рационального места размещения данного накопителя, а также на разработку силовой схемы подключения и оптимизацию режимов работы накопителя.

1.Далека В.Х., Личов Д.О., Гордієнко О.С. Управління комунікаціями проектів ресурсозбереження // Матеріали III Всеукр. наук.-практ. конф. «Проблеми і перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві». – Алушта, 2007. – С.172-175.

2.Личов Д.О., Гордієнко О.С., Скуріхін І.Л. Підвищення працездатності технічних засобів міського електричного транспорту // Матеріали III Всеукр. наук.-практ. конф. «Проблеми і перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві». – Алушта, 2006. – С.73-76.

3.Гордієнко О.С., Гарбуз Н.В. Математичне моделювання енергоспоживання в КП «Краматорське ТТУ» // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Сталий розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення». – Харків: ХНАМГ, 2009. – С.19-20.

4.Крутий Л.М., Голтв'янський М.А., Гордієнко О.С. Концепція вирішення питання рекуперації гальмівної енергії технічних засобів електротранспорту // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Сталий розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення». – Харків: ХНАМГ, 2009. – С.17-19.

Получено 28.09.2009